

13.4

Проводимость емкостного высокочастотного разряда, помещенного в радиальное магнитное поле

© К.В. Вавилин, И.И. Задириев, Е.А. Кралькина, А.М. Никонов, Г.В. Швыдкий

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
E-mail: ekralkina@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2023 г.

В окончательной редакции 26 июля 2023 г.

Принято к публикации 14 сентября 2023 г.

Рассмотрен транспорт электронов между электродами в емкостном высокочастотном разряде, зажигаемом в источнике плазмы, имеющем геометрию стационарного плазменного двигателя. Сравнение импеданса разряда, определенного на основании экспериментальных вольт-амперных характеристик, с расчетами, выполненными в предположении наличия в разряде классической проводимости поперек магнитного поля, показало существенное расхождение результатов.

Ключевые слова: емкостной высокочастотный разряд, магнитное поле, импеданс.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.21.56459.19571

В настоящее время одним из наиболее востребованных электроракетных двигателей является стационарный плазменный двигатель (СПД), основные преимущества которого состоят в простоте конструкции и надежности работы. Параллельно с практическим использованием СПД в лабораториях многих стран мира ведутся фундаментальные исследования разряда постоянного тока (РПТ), помещенного в магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей, который лежит в основе рабочего процесса двигателя. Актуальной проблемой физики разряда является выяснение механизма переноса тока от катода к аноду, который не удастся описать с помощью классического механизма проводимости плазмы поперек магнитного поля. В настоящее время для объяснения аномального транспорта электронов в разряде используют модели пристеночной проводимости и модели, рассматривающие возбуждение колебаний и волн в разряде на различных частотах (от 10 kHz до 1 GHz) [1].

В [2] в качестве рабочего процесса СПД был использован емкостной высокочастотный разряд (ЕВЧР). Это оказалось возможно ввиду наличия в ЕВЧР приэлектродных скачков потенциала аналогично РПТ. Для реализации ЕВЧР в источнике плазмы с геометрией СПД на анод (нагруженный электрод) вместо постоянного напряжения подавалось высокочастотное напряжение с частотой от 2 до 13.56 MHz. В качестве второго (заземленного) электрода выступал корпус СПД. Катод не использовался. По результатам изучения такого разряда были опубликованы работы, в частности [2], в которых приведены зависимости интегральных и локальных характеристик плазмы от внешних параметров. Так, измерения показали, что использование ЕВЧР позволяет получать потоки ускоренных ионов инертных газов и воздуха с энергией 70–400 eV в зависимости от схемы организации разряда. Эти результаты могут помочь в

оптимизации разряда для создания эффективного космического двигателя. Тем не менее до сих пор не был рассмотрен фундаментальный вопрос о проводимости электронов поперек магнитного поля в устройстве, основанном на высокочастотном (ВЧ) разряде. Настоящая работа посвящена анализу применимости модели классической проводимости для описания транспорта электронов в ЕВЧР при наличии внешнего магнитного поля с преимущественной радиальной составляющей.

Для изучения транспорта электронов между электродами ЕВЧР были измерены вольт-амперные характеристики разряда $I_{RF}(V_{RF})$ и сдвиг фаз $d\varphi(V_{RF})$ между ВЧ-током и ВЧ-напряжением. В экспериментах применялся источник плазмы, выполненный в геометрии двигателя СПД-70. В настоящей работе использовались данные, полученные в экспериментах, когда электроды, между которыми подавалось ВЧ-напряжение, были замкнуты по постоянному току. Для этого нагруженный электрод заземлялся через дроссель (индуктивность большой величины, которая составляла $150 \mu\text{H}$). В ряде экспериментов на нагруженный электрод подавалось положительное или отрицательное смещение V_{dc} .

Измеренные значения $I_{RF}(V_{RF})$ и $d\varphi(V_{RF})$ были использованы для расчета действительной и мнимой частей импеданса разрядного промежутка. Полученные результаты сравнивались с импедансом, рассчитанным на основании классической проводимости плазмы в поперечном магнитном поле.

Для численного расчета импеданса разряда использовалась эквивалентная схема ЕВЧР, показанная на рис. 1. Разрядная цепь состоит из емкостей приэлектродных слоев C_{sh1} и C_{sh2} , сопротивления R_p , определяющего сопротивление разряда, где присутствует азимутальный дрейф электронов, и реактивного элемента C_p , который появляется вследствие наличия мнимой части проводимости плазмы. В случае замкнутых по постоянному току

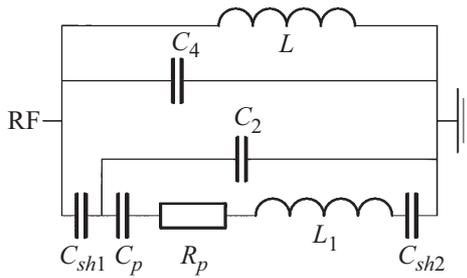


Рис. 1. Эквивалентная схема ЕВЧР с внешним радиальным магнитным полем.

электродов параллельно разрядному промежутку был включен дроссель, который представлен в виде индуктивности L величиной $150 \mu\text{H}$. Учтено также наличие паразитных емкостей, которые представлены емкостями C_2 и C_4 .

Для расчета импеданса разряда Z использовались формулы для импеданса плазменной части одномерного плазменного конденсатора малой длины d_c [3]:

$$Z_p(\omega) = R_p(\omega) + i \frac{1}{\omega C_p(\omega)},$$

$$R_p = \frac{1}{\omega C_0} d_c^{-1} \int_0^{d_c} \frac{\epsilon''_{zz} dz}{(\epsilon'_{zz})^2 + (\epsilon''_{zz})^2},$$

$$\frac{1}{C_p(\omega)} = \frac{1}{C_0} d_c^{-1} \int_0^{d_c} \frac{\epsilon'_{zz} dz}{(\epsilon'_{zz})^2 + (\epsilon''_{zz})^2},$$

где $C_0 = \frac{S}{4\pi d_c}$, ϵ'_{zz} , ϵ''_{zz} — действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, $S = \frac{\pi d_{outer}^2}{4} - \frac{\pi d_{inner}^2}{4}$ — площадь сечения объема, заключенного между коаксиальными цилиндрами диаметром d_{outer} и d_{inner} .

Формулы могут быть использованы в предположении, что проводимость плазмы вдоль силовых магнитных линий бесконечна.

Диэлектрическая проницаемость использовалась в виде

$$\epsilon'_{\perp} = 1 - \frac{\omega_{Le}^2}{\omega^2 - \Omega_e^2},$$

$$\epsilon''_{\perp} = \frac{\omega_{Le}^2 (\omega^2 + \Omega_e^2) \nu_e}{\omega (\omega^2 - \Omega_e^2)^2},$$

где ω_{Le} , Ω_e и ω — ленгмюровская, ларморовская и рабочая частоты, ν_e — частота столкновений.

На рис. 2 показаны зависимости действительной части импеданса Re от величины постоянного тока I_{dc} , который течет в цепи между электродами. В данном случае считалось, что ток I_{dc} пропорционален концентрации плазмы. Можно видеть, что в случае $V_{dc} = 0$ зависимость действительной части импеданса от постоянного тока, текущего во внешней цепи разряда (концентрации плазмы), насыщается с ростом I_{dc} . При подаче отрицательного смещения на нагруженный электрод область токов I_{dc} сужается со стороны больших значений, и область насыщения зависимости $\text{Re}(I_{dc})$ не наблюдается. Напротив, при подаче положительного смещения на нагруженный электрод зависимость $\text{Re}(I_{dc})$ становится немонокотонной, причем положение максимума смещается в область меньших значений тока I_{dc} . Так, в режиме разряда, при котором на нагруженный электрод подается 100 В, действительная часть проходит через максимум при 0.3–0.4 А. При увеличении V_{dc} до 200 В кривая смещается влево, и максимум достигается при 0.25–0.3 А. При $V_{dc} = 300 \text{ В}$ положение максимума, по-видимому, лежит вне рассмотренной области I_{dc} .

Рассматривая частотную зависимость активного сопротивления при $V_{dc} = 0 \text{ В}$ (рис. 2, б), можно отметить, что область насыщения осталась за пределами диапазона разрядного тока для всех исследуемых частот. Однако предполагаемое положение максимума различно для разных частот. Так, для частоты 13.56 МГц максимум

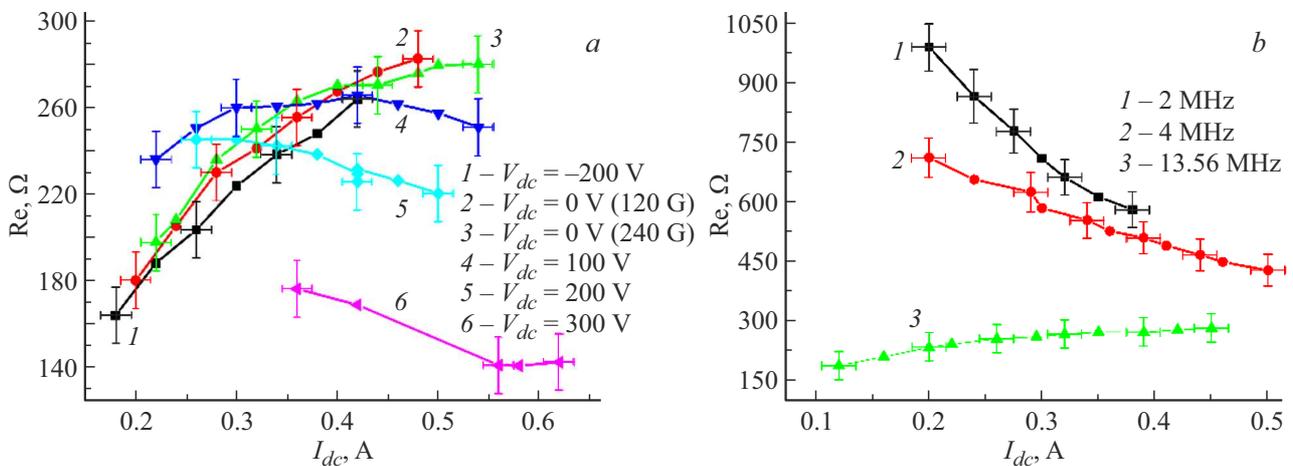


Рис. 2. Зависимость действительной части импеданса от I_{dc} для различных величин постоянного напряжения (а) и различных частот ВЧ-генератора (б).

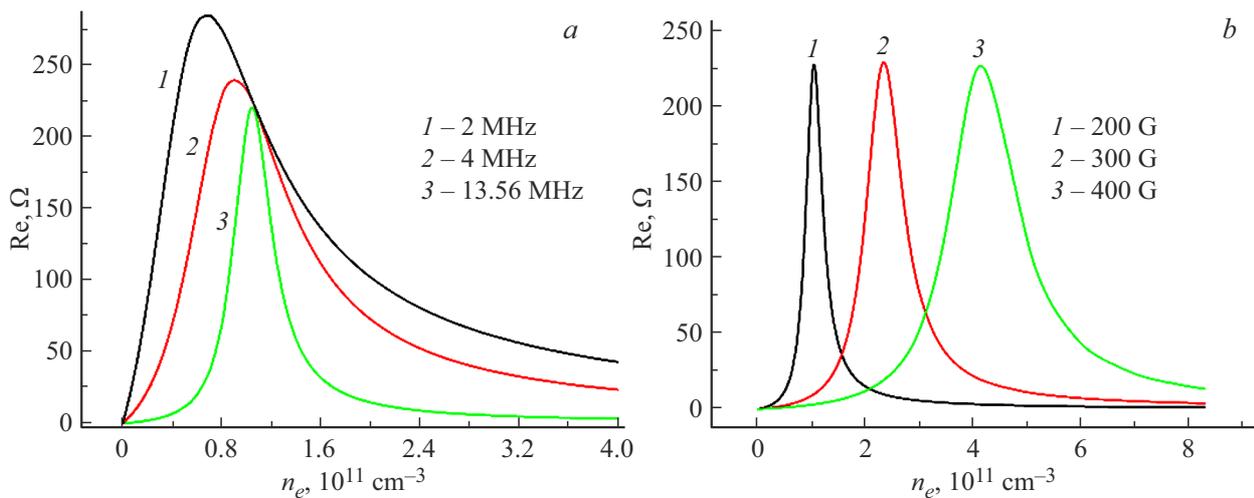


Рис. 3. Расчетная зависимость действительной части импеданса от концентрации плазмы для различных значений частоты ВЧ-генератора (а) и величин индукции магнитного поля при частоте 13.56 МГц (б). $C_{sh1} = 20 \text{ pF}$, $C_{sh2} = 1000 \text{ pF}$, $C_2 = 20 \text{ pF}$, $C_4 = 40 \text{ pF}$, $B = 200\text{--}400 \text{ G}$, $P = 10^{-3} \text{ Вт}$.

активного сопротивления лежит в области больших разрядных токов (справа). Понижение частоты смещает этот максимум в сторону меньших значений постоянного тока I_{dc} , т.е. меньших концентраций плазмы. При этом происходит увеличение абсолютного значения сопротивления, максимальное значение которого составляло порядка 1000Ω и реализовалось на частоте 2 МГц.

Наиболее интересные результаты были получены при изучении поведения $Re(I_{dc})$ при изменении индукции внешнего магнитного поля. Было установлено (кривые 2 и 3 на рис. 2, а), что величина индукции магнитного поля практически не оказывает влияния на действительную и мнимую части импеданса разряда при всех рассмотренных частотах.

Математически рассчитанные зависимости действительной части импеданса от концентрации плазмы для различных значений частоты ВЧ-генератора и величин индукции магнитного поля представлены на рис. 3. Можно отметить немонотонную зависимость кривой, что наблюдается и в экспериментальных результатах. Увеличение частоты приводит к уменьшению действительной части импеданса, а также к смещению пика в сторону больших концентраций (рис. 3, а).

На положение максимума и его ширину также влияют величины емкостей и индукция магнитного поля. Так, с увеличением магнитного поля пик смещается в сторону больших концентраций и уширяется, как показано на рис. 3, б.

Сравнивая экспериментальные данные с расчетными результатами, можно сделать вывод, что модель классической проводимости может лишь частично качественно описать характер импеданса. Так, частотная зависимость объясняет смещение максимума действительной части импеданса в сторону меньших концентраций. Также модель показывает увеличение абсолютных величин им-

педанса для более низких частот. Тем не менее модель классической проводимости подразумевает сильное смещение максимумов импеданса при изменении магнитного поля, что не наблюдается в действительности. Это дает основание полагать, что в рассмотренном разряде, так же как в РПТ, классическая проводимость не описывает межэлектродный транспорт электронов.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10090 (<https://rscf.ru/project/21-72-10090/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.-P. Boeuf, *J. Appl. Phys.*, **121** (1), 011101 (2017). DOI: 10.1063/1.4972269
- [2] G.V. Shvydkiy, I.I. Zadiriev, E.A. Kralkina, K.V. Vavilin, *Vacuum*, **180**, 109588 (2020). DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109588
- [3] А.Ф. Александров, М.В. Кузелев, *Теоретическая плазменная электроника* (МГУ им. М.В. Ломоносова, М., 2011).